

KİRİŞLE GÜÇLENDİRİLMİŞ KABUK YAPILAR İÇİN YAPAY SİNİR AĞ BAZLI ANALİZ YÖNTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

Anıl Cankur¹, Ercan Gürses²

^{1,2}Ortadoğu Teknik Üniversitesi Havacılık ve Uzay Mühendisliği, Ankara

ABSTRACT

The purpose of this work is to develop a tool for the design of skin-stringer structures. The tool to be developed needs to quickly identify the load carrying capacity and weight of these structures. For this purpose, a finite element (FE) model of 1440 different skin-stringer structures was created with a script written in Python 2.7, and these models were analyzed using the commercial FE program ABAQUS. The script was used to construct the model, analyze the model, calculate the buckling load, the collapse load and the total mass, and collect the ABAQUS analysis results. The input parameters and analysis results of these 1440 model have been used to create an artificial neural network (ANN) in the MATLAB NNTOL toolbox for fast determination of the buckling load, collapse load, and weight of the skin-stringer assemblies that have not yet been created. The performance of the generated ANN is shown in comparison with FE results.

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, kirişle güçlendirilmiş kabuk yapıların tasarımına yönelik bir araç geliştirmektir. Geliştirilecek aracın bu yapıların yük taşıma kapasitesini ve ağırlığını hızlı şekilde belirlemesi gerekmektedir. Bu amaçla, Python 2.7 programı kullanılarak yazılmış bir betikle 1440 farklı güçlendirilmiş kabuk yapının sonlu elemanlar (SE) modeli oluşturulmuş ve ticari SE programı olan ABAQUS kullanılarak bu modeller analiz edilmiştir. Yazılan betik, modelin oluşturulması, modelin analizi, burkulma yükünün, çökme yükünün ve toplam ağırlığın elde edilmesi ve ABAQUS analiz sonuçlarının derlenmesi için kullanılmıştır. Bu 1440 modelin girdi parametreleri ve analiz sonuçları, hâlihazırda yaratılmamış olan güçlendirilmiş kabuk yapıların burkulma yükünü, çökme yükünü ve ağırlığını hızlı bir şekilde belirlemek için MATLAB NNTOL araç kutusunda bir yapay sinir ağı (YSA) oluşturulmasında kullanılmıştır. Oluşturulan YSA'nın performansı SE sonuçlarıyla yapılan karşılaştırmalarla gösterilmiştir.

GİRİŞ

Kirişler, uçağın boyuna yönde kabuğa bağlanan takviye elemanlarıdır. Bu takviye elemanları hem kabuğun burkulmasını hem de burkulmadan sonra yapının çökmesini önlemek için kullanılır [1]. Burkulma genellikle kiriş ile güçlendirilmiş bir panelin ilk çökme modu olarak düşünülen bir kararsızlık problemidir. Burkulma yükü, malzeme özellikleri, panel kalınlığı ve panel uzunluğunun bir fonksiyonudur [2]. Burkulmadan sonra kabuğun yapısal işlevini yitirmiş bölümündeki yükler takviye kirişlerine ve kabuğun yapısal işlevini koruyan bölümlerine aktarılır [3]. Kirişler ve işlevini yitirmemiş kabuk bölgesi yükü taşımaya devam edebilir. Bu nedenle, bir uçak yapısının yük taşıma kapasitesi, bir takviyeli kabuk yapının tasarımından önemli ölçüde etkilenir [4]. Şekil 1'de, bir helikopterin gövde takviyeli kabuk yapısının (solda) ve kuyruk bölgesi takviyeli kabuk yapısının (sağda) görselleri verilmiştir.

En iyi takviyeli kabuk yapısına sahip olmak için yapının maksimum yük taşıma kapasitesi ve minimum ağırlık ile tasarlanması gereklidir. Bu amaca yönelik bir eniyileme işlemi, bir takviyeli kabuk yapısının çeşitli tasarım parametreleri kombinasyonları ile ayrıntılı yapısal analizlerini gerektirir. Bu çalışmada, eniyileme işlemi için kullanılabilecek kritik yükleri ve yapının ağırlığını elde etmek için hızlı ve doğru bir çözüm yöntemi geliştirilmesi amaçlanmıştır.



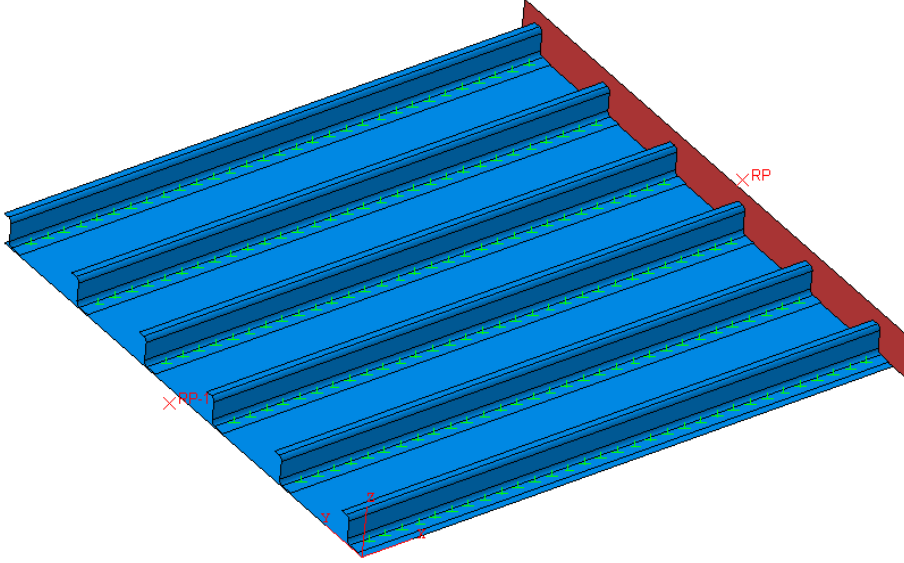
Şekil 1. Helikopter gövdesi takviyeli kabuk yapısı (solda) ve kuyruk bölgesi takviyeli kabuk yapısı (sağda)

Yapay sinir ağı (YSA), girdi olarak kullanılan verileri gözlemleyip öğrenerek büyük veri setleri arasında bir girdi-çıktı ilişkisi oluşturabilir. Bir takviyeli kabuk yapısının kritik yükleri ve ağırlığı, ayrıntılı bir SE modelinin oluşturulması ve analiz edilmesi yerine YSA kullanıldığında çok daha hızlı elde edilebilir. Bu sayede, eniyileme süreci hızlanır ve optimum parametrelere ulaşmak için daha fazla deneme yapılabilir.

Bir YSA oluşturmak için Python 2.7’de yazılmış bir betikle 1440 farklı takviyeli kabuk yapısının sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuş ve modeller ticari bir SE programı olan ABAQUS kullanılarak analiz edilmiştir. Yapı, taşıma kapasitesinin sonuna kadar bir eksenel basmaya tabi tutulmuştur. Analiz sonuçlarından reaksiyon kuvveti-eksenel yer değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Kuvvet-yer değiştirme sonucu, takviyeli kabuk yapısının burkulma yükünü ve çökme yükünü belirlemek için kullanılmıştır. 1440 sonlu eleman analizinin sonuçları ve gerekli girdileri yazılan betik ile derlenmiştir. Bir takviyeli kabuk yapısının sonlu elemanlar analizine gerek duymadan yük kapasitesini ve kütlesini hesaplayan bir yapay sinir ağı oluşturmak için MATLAB NNTOOL programı kullanılmıştır.

YÖNTEM

Takviyeli kabuk yapısının modeli, Z kesitli kirişlerle takviye edilmiş düz bir panel olarak seçilmiştir [5]. Yapı basma yüklemesine tabi tutulmuştur. Düzgün şekilde yayılı bir yük uygulamak için Şekil 2’de kırmızı renkte gösterilen iki boyutlu rijit kabuk parça kullanılmıştır. Basma yükü rijit kabuk üzerine yer değiştirme olarak uygulanmıştır. Yer değiştirmeyi uygulamak için çerçeve üzerinde Şekil 2’de “RP” olarak gösterilen bir referans noktası oluşturulmuştur. YZ düzleminde bir başka referans noktası “RP-1” oluşturulmuş ve çok noktalı kısıtlama (MPC) bağlantıları vasıtasıyla (0, y, z) düzlemdeki bütün düğüm noktaları bu noktaya bağlanmıştır. “RP-1” noktasının her üç yönde yer değiştirmesi ve her üç eksen etrafındaki dönmesi sıfır olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2. Takviyeli kabuk yapısı modeli

ABAQUS, bir malzemenin elastoplastik özelliklerini modellemek için gerçek gerilme ve gerinim verilerini gerektirir. Bu nedenle, her iki malzemenin de gerilme-gerinim ilişkisi Ramberg-Osgood denklemi ile elde edilmiştir [6].

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n$$

Burada, ϵ tek eksenli gerinim, σ tek eksenli gerilmedir, E , elastik modül, σ_0 , akış dayanımı kuvveti ve n , Ramberg-Osgood sayısıdır.

1440 Takviyeli kabuk yapısının analizlerinde iki tür malzeme kullanılmıştır: 2024-T3 kaplı sac levhalar ve 2024 T42 kaplı sac levhalar. Her iki malzeme de havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan 2024 serisi kaplanmış alüminyum levhalar olarak seçilmiştir. Bu materyallerin özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1: Malzeme özellikleri

	2024-T3 Clad	2024-T42 Clad
Young Modülü (MPa)	72395	72395
Poisson Oranı	0.33	0.33
Yoğunluk (g/cc)	2.768	2.768
Akma Mukavemeti (MPa)	310	241
Ramberg-Osgood Sayısı	15	17

Elde edilen gerilme-gerinim, gerçek gerilme-gerinim ilişkisine dönüştürülmüştür [7].

$$\sigma_{tr} = \sigma_{eng}(1 + \epsilon_{eng})$$

$$\epsilon_{tr} = \ln(1 + \epsilon_{eng})$$

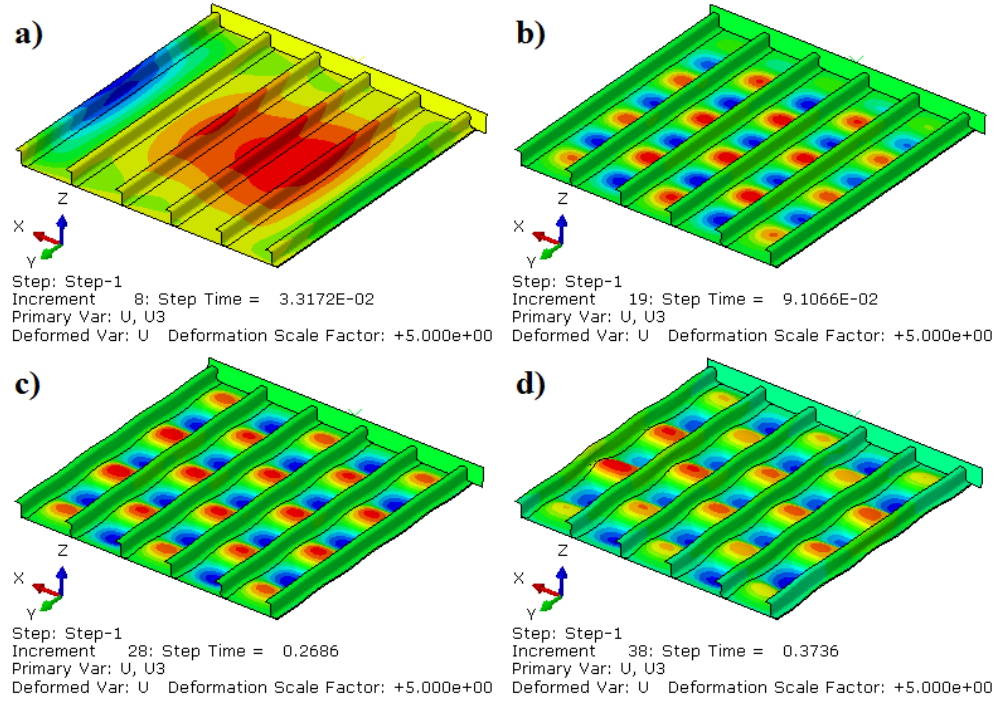
Bu bölümde anlatılan sonlu elemanlar modelinin analizinde, alüminyum 2024-T3 kaplı sac kullanılmış ve analiz sonuçlarından aşağıdaki verileri elde edilmiştir:

- Çökme yükü : 126.7 kN
- Burkulma yükü : 37.1 kN

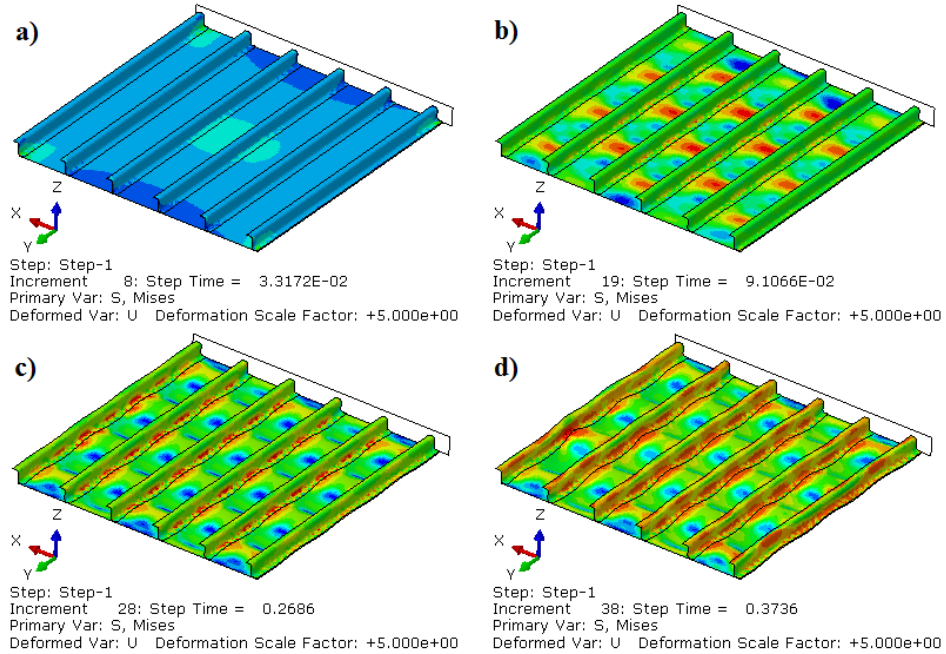
- Kütle : 775 g

Takviyeli kabuk yapısının sonlu elemanlar analizi sonuçları da Şekil 3'te ve Şekil 4'te düzlem dışı deformasyon konturları ve Von Mises konturları olarak verilmiştir. Şekiller, yapının çökme anına kadarki dört aşamasını içermektedir. Bu aşamalar şunlardır:

- Burkulma öncesi
- Burkulma anı
- Burkulma sonrası
- Çökme anı



Şekil 3. Düzlem dışı deformasyon konturları



Şekil 4. Von Mises gerilmesi konturları

Model, doğrusal olmayan geometri seçeneği (nlgeom = ON) ve elastik olmayan (elastoplastik) malzeme özellikleri ile ABAQUS'un "Static, General" basamağını kullanarak çözülmüştür [8].

Bir ABAQUS modelini oluşturmak, analiz etmek, burkulma yükü, çökme yükü ve sistemin toplam ağırlığını analiz sonuçlarından toplamak için Python 2.7'de bir betik yazılmıştır. Sonuçlar bir yapay sinir ağı (YSA) oluşturmak için MATLAB NNTOOL programı aracılığıyla işlenmiştir.

Betik:

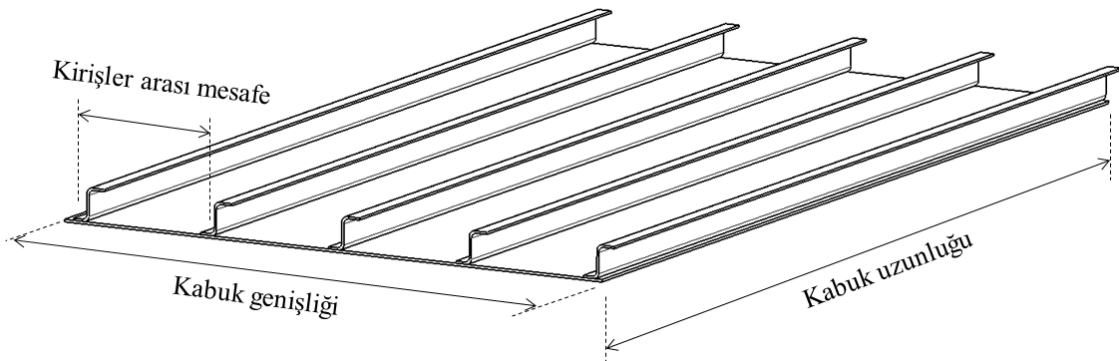
ABAQUS, Python 2.7 ile yazılmış betikleri çalıştırabildiği için, sonlu elemanlar modeli oluşturmak, analiz etmek ve sonuçları toplamak için bir Python 2.7 betiği kullanılmıştır.

Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması ve Analizi: Betik, aşağıdaki parametrelerin kullanıcı tarafından belirlenebilmesine izin vermektedir;

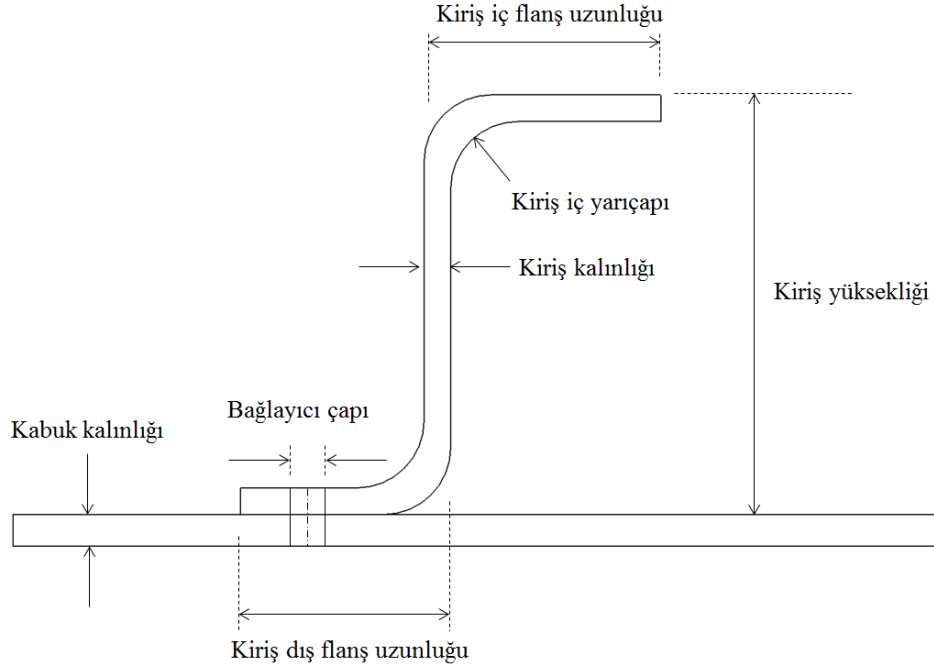
- Kabuk kalınlığı
- Z-kiriş kesitinin kalınlığı
- Z-kiriş kesitinin yüksekliği
- Z-kiriş kesitinin iç flanş uzunluğu
- Z-kiriş kesitinin dış flanş uzunluğu
- Z-kiriş kesitinin iç yarıçapı
- Kabuk malzemesi
- Kiriş malzemesi
- Kabuk uzunluğu
- Kabuk genişliği
- Kirişler arası mesafe
- Bağlayıcı çapı

Takviyeli kabuk yapısının geometrik parametreleri Şekil 5'te, kiriş kesitinin geometrik parametreleri ise Şekil 6'da gösterilmiştir.

Kiriş sayısı, kabuk genişliği ve kirişler arasındaki mesafe dikkate alınarak hesaplanır. Kullanıcı tarafından belirlenen kabuk genişliği ve kirişler arası mesafe kullanılarak modele maksimum sayıda kiriş yerleştirilir. Kabuğun kalan alanı kabuğun her iki yanına eşit şekilde dağıtılır.



Şekil 5. Takviyeli kabuk yapısı geometrik parametreleri



Şekil 6. Z-kiriş kesitinin geometrik parametreleri

Zaman ve kaynakları en aza indirmek için, betik dosyası maksimum kapasitede kullanılmamıştır. Parametrelerin bazıları için belirli tasarım kriterlerinin göz önüne alınmasıyla sabit değerler kabul edilmiştir. Aşağıdaki parametrelerin, burkulma ile ilgili ve burkulma sonrası özelliklerde düşük etkilere sahip olduğu kabul edilmiş ve bu nedenle bu parametreler aşağıda verilen değerlere sabitlenmiştir:

- Kiriş kesit iç yarıçapı = 2.5 mm
- Kabuk genişliği = 350 mm
- Bağlayıcı çapı = 3.2 mm

Yukarıdaki değerler ortalama tasarım değerlerini dikkate alarak seçilmiştir. Kirişler arasındaki mesafe kabuk genişliğinden daha kritik bir tasarım parametresidir. Bağlayıcı çapı, takviyeli kabuk yapı analizi sırasında göz önüne alınmayıp, standart bağlayıcı tipleri arasından takviyeli kabuk yapının yük taşıma kapasitesine uygun olacak şekilde seçilmektedir. Z-kiriş kesitinin iç yarıçapı, flanşlara ve yüksekliğe kıyasla kesit özellikleri üzerinde önemsiz bir etkiye sahiptir. Bu nedenlerle, bu üç parametre analizlerde değişken olarak kabul edilmemiştir.

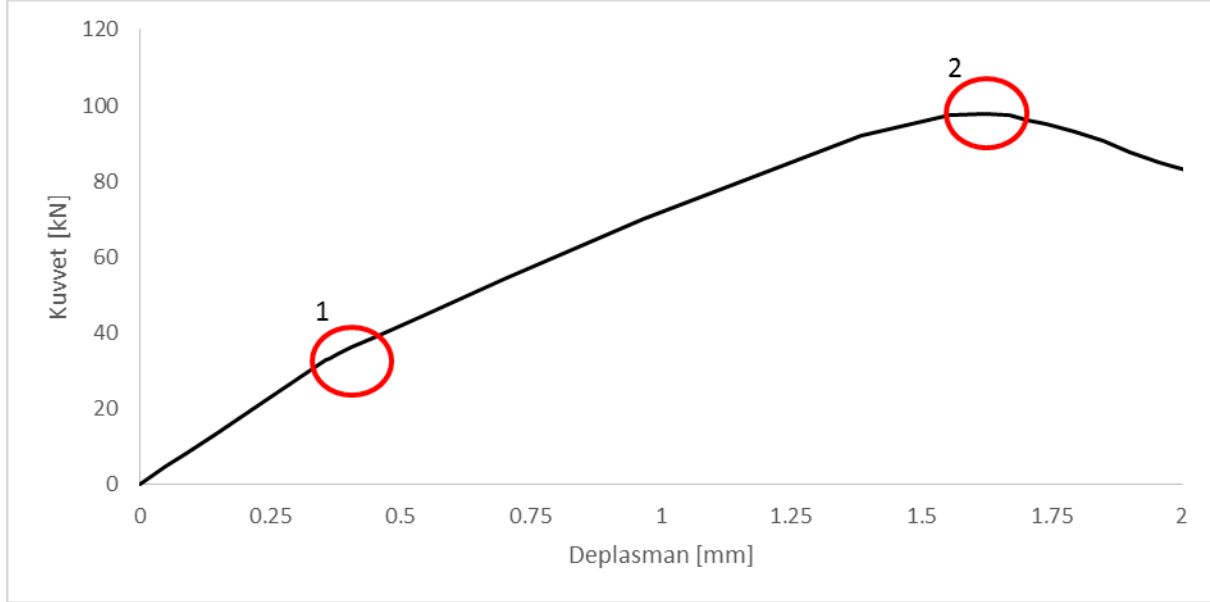
Sonlu eleman analizleri için aşağıdaki parametre değerleri kullanılmıştır. Sonuç olarak, analizlerin toplam sayısı aşağıdaki değerlerin kombinasyonlarına sahip olacak şekilde 1440 olarak hesaplanmıştır:

- Kabuk kalınlığı [mm] = [1.0, 1.27, 1.42, 1.6]
- Z-kiriş kesitinin kalınlığı [mm] = [1.0, 1.27, 1.42, 1.6]
- Z-kiriş kesitinin yüksekliği [mm] = [20.0, 30.0]
- Z-kiriş kesitinin iç flanş uzunluğu [mm] = [10.0, 15.0]
- Z-kiriş kesitinin dış flanş uzunluğu [mm] = [10.0, 20.0]
- Kabuk malzemesi = [AL2024 T3, AL2024 T42]
- Kiriş malzemesi = [AL2024 T3, AL2024 T42]
- Kabuk uzunluğu [mm] = [300.0, 350.0, 400.0]

- Kirişler arasındaki mesafe [mm] = [60.0, 70.0, 80.0]

Analiz sayısını en aza indirmek için her parametre için toplam değer sayısı en düşük seviyede tutulmuştur. Kabuk ve kiriş kalınlığının, burkulma yükü ve çökme yükü üzerinde belirgin etkileri vardır. Bu nedenle, bu parametreler için nispeten geniş değer aralıkları tanımlanmıştır. Kiriş kesitini tanımlayan özellikler her parametre için iki değer ile sınırlandırılmıştır.

Sonuçların Toplanması: Şekil 7’de örnek kuvvet - deplasman eğrisi verilmiştir.



Şekil 7. Bir takviyeli kabuk yapısı için tipik kuvvet - yer değiştirme eğrisi

Şekil 7’deki daire-1’de gösterilen eğim değişimi ilk burkulma yüküne ve daire-2’de gösterilen eğim değişimi çökme yüküne karşılık gelmektedir. Kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin eğim değişikliklerini izleyerek, burkulma yükü ve çökme yükü analiz sırasında elde edilmiştir. Tasarım açısından çok önemli olan yapının ağırlığı da analiz sonuçlarından elde edilmiştir.

Analiz sırasında yapı üzerindeki kuvvet izlenir. Bu şekilde analiz, hesaplama zamanını boşa harcamadan maksimum kuvvet değerinde son bulur.

Yapay Sinir Ağı (YSA):

1440 analizin girdi ve çıktıları, bir yapay sinir ağı (YSA) oluşturmak için MATLAB NNTOOL programı aracılığıyla işlenir. YSA’nın amacı, girdiler ve çıktılar arasında bir ilişki oluşturmak ve bu sistemi kullanarak herhangi bir girdi seti için mümkün olduğunca hassas çıktılar vermektir.

YSA oluşturulmasında kullanılan parametrelerden nöron sayısını belirlemek için nöron sayısının 1 ile 100 arasında değiştiği ağlar oluşturulmuştur. Her bir ağın çıktıları SE sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. 48 nöronlu ağın en iyi performansı verdiği bulunmuştur.

Yapılan analizlerin % 90’ı YSA’nı eğitmek için, % 5’i doğrulamak için, % 5’i de test etmek için kullanılmıştır. Ağ performansı, sonlu eleman sonuçları ile arasında % 5’ten fazla fark olan YSA sonuçlarının sayısına dayanarak ölçülmüştür. İstenen performansla 20 YSA elde edilinceye kadar çok sayıda YSA farklı % 90’ı içeren eğitim setleriyle oluşturulmuştur.

YSA’larının performansını kontrol etmek için başlangıçtaki 1440 analize ek olarak yedi yeni model daha oluşturulmuştur. Daha sonra en iyi performansa sahip YSA seçilmiştir.

SAYISAL SONUÇLAR

İlk 1440 analizden sadece 95’inde (% 6.6) üç çıktıdan herhangi birinde YSA sonuçlarının SE sonuçlarından % 5 veya daha fazla fark ettiği görülmüştür. Bu analizlerin sadece 8’i (% 0.56), % 10 veya daha fazla fark göstermiştir. Maksimum hata, burkulma yükü için % 15.45, çökme yükü için % 6.02 ve kütle için % 6.97 olarak bulunmuştur. En iyi performansı veren YSA ek olarak üretilen 7 modelle test edilmiştir. Bu 7 modelin YSA sonuçlarının sonlu eleman sonuçlarına göre maksimum farkı % 2.36 olarak bulunmuştur. Çizelge 2’de 7 ek analiz girdi parametre seti ve Çizelge 3’te YSA sonuçları, sonlu elemanlar analizi sonuçları ve buna karşılık gelen hata yüzdeleri gösterilmiştir.

Çizelge 2. Ek analizler için FE girdileri

Model numarası	1	2	3	4	5	6	7
Kabuk kalınlığı [mm]	0.8	1	1	1	1.3	1	1
Kiriş kesitinin kalınlığı [mm]	1.3	1.27	1.27	1.27	1.5	2	2
Kiriş kesitinin yüksekliği [mm]	20	25	25	20	20	20	20
Kiriş kes. iç fl. uzunluğu [mm]	10	10	10	10	10	10	10
Kiriş kes. dış fl. uzunluğu [mm]	10	12	12	10	10	10	10
Kabuk malzemesi	2024T3	2024T3	2024T3	2024T3	2024T3	2024T3	2024T42
Kiriş malzemesi	2024T3	2024T3	2024T42	2024T3	2024T3	2024T3	2024T42
Kabuk uzunluğu [mm]	350	350	350	370	450	350	350
Kirişler arası mesafe [mm]	70	70	70	65	70	70	70
Kiriş kesitinin iç yarıçapı [mm]	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Kabuk genişliği [mm]	350	350	350	350	350	350	350

Çizelge 3. YSA sonuçları, SE sonuçları ve hata yüzdeleri

#	Burkulma Yükü [kN]			Çökme Yükü [kN]			Toplam Ağırlık [N]		
	YSA Sonuçları	SE Sonuçları	Hata (%)	YSA Sonuçları	SE Sonuçları	Hata (%)	YSA Sonuçları	SE Sonuçları	Hata (%)
1	53.18	52.90	0.53	98.10	97.34	0.78	9.07	9.14	0.78
2	66.00	65.03	1.50	106.12	105.58	0.51	9.07	9.14	0.84
3	53.12	52.90	0.43	108.68	109.94	1.15	8.93	9.14	2.36
4	64.85	65.03	0.26	119.05	119.25	0.16	9.31	9.14	1.83
5	36.68	37.29	1.63	84.14	83.77	0.44	8.76	8.57	2.24
6	38.08	37.29	2.11	91.08	92.72	1.77	8.43	8.57	1.58
7	36.51	37.29	2.11	92.38	91.56	0.90	8.52	8.57	0.59

SONUÇLAR

Bu çalışmada yapay sinir ağına dayalı bir analiz yöntemi geliştirilmiştir. Kirişle güçlendirilmiş kabuk yapıların doğrusal olmayan yapısal analizini gerçekleştirmek için YSA'nın kullanılmasının hızlı ve doğru çözümler sağlayabileceği görülmüştür.

YSA'nın performansı iki farklı veri kümesiyle test edilmiştir. İlk küme YSA'nın eğitiminde kullanılan veri kümesidir. İkinci küme ise eğitim kümesinde yer almayan girdi parametreleri ile oluşturulan ek verileri içeren bir kümedir. İki veri kümesi için de ANN ve SE sonuçları toplanmış ve karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma, önerilen YSA sonuçlarının, SE sonuçlarına kıyasla, burkulma yükünü, çökme yükünü ve yapının kütleini maksimum % 2.5 hata ile öngördüğünü göstermektedir. Bununla birlikte, YSA aracı SE analizinden önemli derecede daha hızlıdır. Bu nedenle, öngörülen aracın ön tasarımda kullanılabileceğine inanılmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Bruhn, E.(1973) *Analysis and Design of Flight Vehicle Structures*, 1973 Edition, Jacobs Publishing INC., s: C5-1 – C12-1, 1973
- [2] Niu, M.(1999) *Airframe Stress Analysis and Sizing*, 2nd Edition, Hong Kong Conlimit Press LTD., s: 451-468, Ocak 1999
- [3] Colier C., Yarrington, P., Gustafson, P & Bednarczyk, B.(2009) *Local Post Buckling: An Efficient Analysis Approach for Industry Use*, 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Stuctural Dynamics, and Materials Conference, Palm Springs, California, 4-7 May 2009
- [4] Mert, M., & Kayran, A. (2015). *Post-Buckling Load Redistribution of Stiffened Panelin Aircraft Wingbox Structures*. 8th Ankara International Aerospace Conference, METU, Ankara, 10 - 12 September 2015.
- [5] Ambri, A., & Kaur, R. (2014). *Spars and Stringers - Function and Designing*. International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering, 1(1): 58-61.
- [6] Ramberg, W., & Osgood, R. (1943). *Description of Stress-Strain Curves by Three Paramaters*. Washington: National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Note, 902.
- [7] Roylance, D. (1999). 3.11 Mechanics of Materials. Fall 1999. Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare, https://ocw.mit.edu/courses/materials-science-and-engineering/3-11-mechanics-of-materials-fall-1999/modules/MIT3_11F99_ss.pdf. License: Creative Commons BY-NC-SA .
- [8] Abaqus 6.13 Documentation. (2013, April). Dassault Systèmes.